

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NO COMPORTAMENTO DE PEIXES NEOTROPICAIS NO CANAL DE FUGA DA USINA DE TRÊS MARIAS**

*Guilherme Antônio Ribeiro de Souza<sup>1</sup> ; Ludmila Moura Moreira Mendes<sup>2</sup>; Hersília de Andrade e Santos<sup>3</sup> ; Fábio Mineo Suzuki<sup>4</sup>; Rogério Cabral de Azevedo<sup>5</sup>; Paulo dos Santos Pompeu<sup>6</sup>;*

**RESUMO** – As Usinas Hidrelétricas ocasionam diversos impactos na ictiofauna devido à fragmentação dos rios e também a alteração do ambiente aquático. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da velocidade no comportamento de duas espécies de peixes no canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias. As espécies estudadas foram o Mandi (*Pimelodus maculatus*) e a Curimba (*Prochilodus argenteus*). Essa avaliação foi realizada por meio da comparação de dados adquiridos em um modelo numérico tridimensional de fluidodinâmica computacional (CFD) com dados biológicos obtidos por meio de telemetria acústica. Observou-se que a velocidade do escoamento influencia o comportamento das duas espécies, principalmente a Curimba.

**Palavras-Chave** – CFD; ictiofauna; velocidade.

**ABSTRACT**– The Hydroelectric Power Plants cause several impacts on the ichthyofauna due to the fragmentation of the rivers and also the alteration of the aquatic environment. This study aimed to evaluate the influence of flow velocity on the behavior of two fish species in the escape channel of the Três Marias Hydroelectric Plant. The species studied were Mandi (*Pimelodus maculatus*) and Curimba (*Prochilodus argenteus*). This evaluation was performed by comparing data obtained in a 3D numerical model of computational fluid dynamics (CFD) with biological data obtained with acoustic telemetry. It was observed that the flow velocity influences the behavior of the two species, the influence is more evident in Curimba.

**Keywords** – CFD; ichthyofauna; velocity.

### **INTRODUÇÃO**

As Usinas hidrelétricas (UHE) são responsáveis por aproximadamente 60% da energia produzida no Brasil (ANEEL, 2019). Tal importância é justificada, pois essa fonte de energia apresenta baixo custo operacional, favorece a regulação de secas e inundações e permite a utilização das barragens para práticas recreativas.

1) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG). E-mail guilhermears@yahoo.com.br

2) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG). E-mail mm.ludmila@gmail.com

3) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG). E-mail hsantos@civil.cefetmg.br

4) Pisceis - Consultoria e Serviços Ambientais Ltda. E-mail suzuki.fms@gmail.com

5) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG). E-mail rogeriocabral@cefetmg.br

6) Universidade Federal de Lavras. E-mail pompeu@ufla.br

Todavia as UHEs apresentam impactos negativos como: reassentamento de populações, crescimento urbano desordenado, restrições à navegação, transmissão de doenças, limitações à migração de peixes, impactos físicos e químicos, sedimentação excessiva a montante e erosão a jusante, alterações de regimes hidrológicos, de padrões de escoamento, de áreas de alagamento e de habitats aquáticos (LOCHER e SCANLON, 2012; CHEN *et al.*, 2015; ZARE; KALANTARI, 2018; FANTIN-CRUZ *et al.* 2015 ).

Os impactos de UHEs são especialmente negativos para ictiofauna, pois podem eliminar as áreas de desova e berçários a montante, além de transformar ambientes lóticos em lênticos (LOURES; GODINHO, 2016). Já a jusante, a ação do vertedouro ocasiona supersaturação de gases na água, o que pode ocasionar embolia e, até mesmo, a morte de peixes (LOURES, 2009; POLITANO *et al.*, 2009). A ictiofauna concentra-se a jusante da barragem, aumentando a possibilidade de arraste pelas turbinas ativas. Já em situações de parada das turbinas, os peixes podem ingressar nestas e morrer em decorrência da baixa oxigenação da água ou sofrer injúrias na reinicialização das turbinas (ANDRADE *et al.*, 2012; LOURES, 2009; SILVA *et al.*, 2012; SUZUKI *et al.*, 2017). A ictiofauna também é afetada por alterações na velocidade e na turbulência as quais dificultam a movimentação contrária ao fluxo (DELAVAN *et al.*, 2017), bem como por modificações no regime hidrológico natural (NESTLERS *et al.*, 2012).

Diante do exposto, observa-se que é necessário estudar da influência das barragens sobre o comportamento da ictiofauna, a fim de promover medidas de mitigação dos impactos por meio de intervenções de engenharia na estrutura. Para compreender os padrões natatórios dos peixes é necessário entender parâmetros hidrodinâmicos como velocidade da água, pressão hidrostática, deformação hidráulica, intensidade turbulenta, energia cinética turbulenta, níveis de dissipação de energia e tensão de cisalhamento (GOODWIN, *et al.*, 2006; SANTOS; DUARTE, 2012; KATOPODIS *et al.*, 2012; VIANA *et al.*, 2016). Ademais, alterações nestes parâmetros podem afetar a acuidade sensorial desses organismos, sua eficiência de natação e, até mesmo, exceder suas capacidades fisiológicas (KATOPODIS *et al.*, 2012).

A combinação dos parâmetros hidráulicos com dados biológicos auxilia o entendimento dos deslocamentos dos peixes nas proximidades de barragens (ARENAS *et al.*, 2015). Tais informações podem ser obtidas com ferramentas de dinâmica Computacional de Fluidos (CFD) associadas à técnica de telemetria acústica. O CFD efetua simulações do escoamento de fluidos sendo uma técnica utilizada em várias aplicações fornecendo informações sobre: fluxo, distribuição de pressão, transporte de sedimentos, interfaces de processos bioquímicos, habitat de peixes e distribuição de temperatura (DANESHVAR *et al.*, 2017). Essa ferramenta tem sido bastante utilizado em simulações em Usinas hidrelétricas para compreender o comportamento de peixes como ocorre nos trabalhos de Arenas *et al.* (2015), Goodwin *et al.* (2014), Piper *et al.* (2015), Wang *et al.* (2012).

Por outro lado, a telemetria acústica é uma técnica que consiste no registro do deslocamento dos peixes através da transmissão e recepção de sinais acústico, permitindo obter dados biológicos em alta resolução (KLIMLEY *et al.*, 2013).

O presente trabalho executou uma simulação numérico tridimensional CFD associada a dados biológicos de peixes, para obter informações referentes a relação entre o comportamento destes e a velocidade do escoamento próximo ao canal de fuga da Usina de Três Marias. Tendo em vista que há poucos estudos nesse campo para a ictiofauna a jusante de barragens na América do Sul (LOURES, 2009), acredita-se que essas informações são importantes para aumentar a compreensão de fenômenos de falsa atração e para melhoria de mecanismos de transposição de peixes neotropicais.

## METODOLOGIA

### 1. Local da pesquisa

A UHE de Três Marias (figura 1) está localizada no município de mesmo nome, em Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas 18°12'50.96" sul e 45°15'45.92" oeste. A usina está situada na região do alto Rio São Francisco e possui um reservatório com uma área de 1.090 km<sup>2</sup>, com uma potência instalada de 396 MW (LOURES; GODINHO, 2016).



Figura 1- a) Canal de Fuga Barragem de Três Marias b) Turbinas c) Vertedouro (GOOGLE, 2019)

### 2. Dados biológicos

Os dados biológicos utilizados neste trabalho foram obtidos por Suzuki *et al.* (2014) entre 31 de outubro de 2011 e 16 de fevereiro de 2012. Efetuou-se o monitoramento de 90 peixes (50 Mandis – *Pimelodus maculatus* - e 40 Curimbas – *Prochilodus argenteus*) no canal de fuga da UHE Três Marias por meio de telemetria acústica. Os peixes foram capturados com tarrafas e submetidos à cirurgia para implantação de transmissores acústicos. Após a recuperação e reestabelecimento do comportamento normal dos peixes, estes foram devolvidos ao canal de fuga da usina. O posicionamento dos peixes ao longo do tempo foi captado por 11 hidrofones e registrado em um

gravador de dados. Removeram-se os dados coletados dos indivíduos que não estavam presentes no canal de fuga nos meses de dezembro e novembro, assim como dos indivíduos em que houve morte, perda do sinal ou do chip. Ao final desse processo de seleção foram analisados os dados de 4 Curimbas e 10 Mandis.

### 3. Modelo numérico

A simulação numérica foi realizada no *software* FLUENT (ANSYS 12), escolhido por sua flexibilidade para resolução de problemas de escoamentos complexo. O modelo numérico foi desenvolvido por Solano (2017), ele possui malha estruturada com 1.483.948 hexaedros e 1.533.297 pontos, a representação da malha assim como as dimensões podem ser observadas na figura 2.

Adotou-se a vazão mais representativa entre 19 de Novembro a 22 de Dezembro 2011, pois nesse período observou-se a maior concentração dos peixes no canal de fuga sem que houvesse a ocorrência de vertimento. O valor total da vazão é 462m<sup>3</sup>/s distribuída entre a turbina 1(92,40 m<sup>3</sup>/s), a turbina 2 (92,18 m<sup>3</sup>/s), a turbina 3 (92,45 m<sup>3</sup>/s), turbina 5 (92,07m<sup>3</sup>/s) e a turbina 6 (92,15 m<sup>3</sup>/s). A turbina 4 não estava em funcionamento na época do experimento (figura 2).

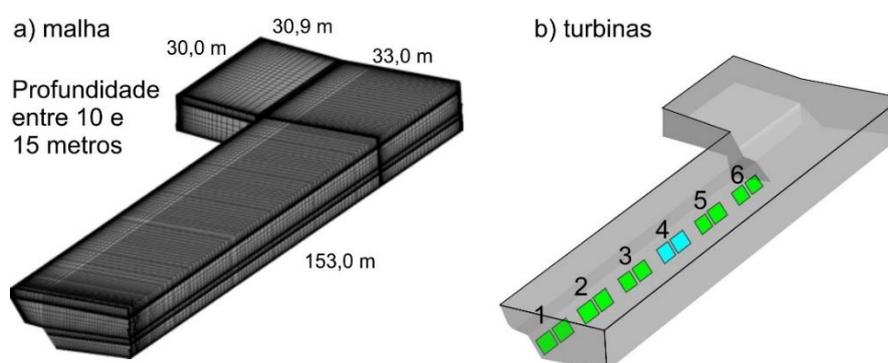


Figura 2- a) Malha do modelo e dimensões. b) Representação das turbinas ativas em verde e inativa em azul claro.

A simulação foi realizada em 7 dias e concluída com 141.500 iterações. As condições de contorno adotadas no modelo são:

- Setor de entrada: vazão das turbinas; Setor de saída: parte extrema do rio a 33m do início do canal de fuga;
- Topo: superfície de interface ar-água utilizou-se *Rigid-lid* que delimita a lâmina tornando o cálculo do escoamento mais simples por trabalhar apenas com a água como fluido.
- Paredes: faces rígidas do canal de fuga e faces laterais.
- Interfaces: superfícies que separam malhas com refinamentos distintos.

Os dados de velocidade foram obtidos no *software* Fluent (Ansys 12) e em seguida exportados para o *software* Tecplot 360 EX 2014 R1, vinculados ao tempo de escoamento.

#### 4. Cruzamento de dados

No *software* Tecplot 360 EX 2014 R1, além dos parâmetros hidráulicos obtidos no *software* Fluent (Ansys 12), inseriu-se os pontos de posicionamento dos peixes no eixo de coordenadas x, y e z. Assim obteve-se os valores de velocidade e a posição em que cada indivíduos se encontrava durante o tempo de escoamento.

Para definir as regiões de maior permanência dos indivíduos estudados, criaram-se 11 volumes de análise, representados na figura 3, assim como o posicionamento de um indivíduo em relação aos volumes de análise. A fim de se obter o percentual de presença dos indivíduos em cada volume, elaborou-se uma tabela para cada peixe. Dividiu-se a quantidade de pontos do indivíduo dentro do volume de análise pelo total de pontos para o indivíduo em toda região simulada. Em seguida, o valor foi multiplicado por 100 para se obter um valor percentual.

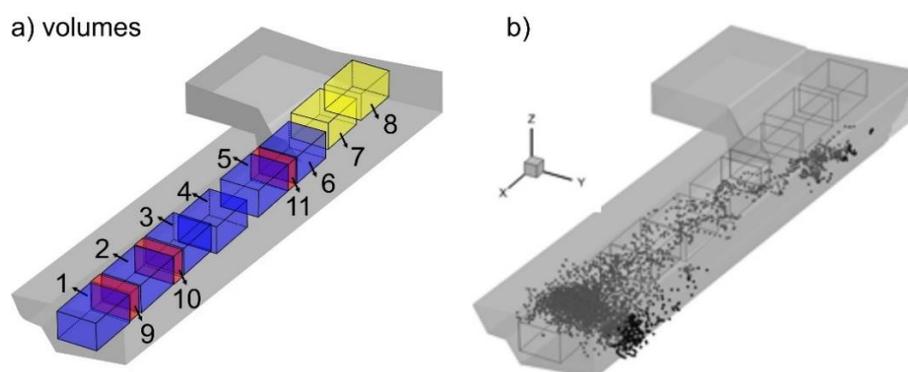


Figura 3 – a) Representação dos volumes de Análise, em azul volumes próximos às turbinas, em vermelho volumes intermediários e em amarelo volumes afastados das turbinas. b) Pontos de presença do indivíduo 5044 – Mandi em novembro de 2011

#### 5. Análise dos dados

Efetuar-se 4 ANOVAs no *Software* “R” versão 3.5.3, para averiguar se a presença dos peixes no volume de análise era afetada significativamente pelo volume analisado. Conduziram-se dois testes de ANOVA para o Mandi (*P. maculatus*), sendo uma no mês de novembro e outra em dezembro, da mesma forma foram conduzidas duas análises para a Curimba (*P. argenteus*) nos meses de novembro e dezembro. Em todas as análises os valores de entrada observados eram os pontos em que os indivíduos se encontravam nos meses de análise e o percentual de presença para cada um deles e em cada volume de análise.

Além disso, construíram-se 4 boxplots, para as situações citadas anteriormente, contendo o percentual de presença dos indivíduos em cada volume de controle, a fim de analisar a presença dos

peixes nos volumes. Para avaliar a mediana da velocidade em cada volume também produziu-se um boxplot no *software* Statistica 10.

## RESULTADOS

### 1. Velocidade

Observou-se que o volume de análise 1 apresenta maior mediana para velocidade. Além disso, é possível constatar que nos volumes próximos às turbinas em operação (1, 2, 3, 5 e 6), a distância entre o primeiro e o terceiro quartil é similar (figura 4). A velocidade máxima observada foi aproximadamente de 1,3 m/s. Além disso, verifica-se, próximo as turbinas em funcionamento, a formação de um jato ascendente e um padrão de velocidade semelhante. (figura 4).

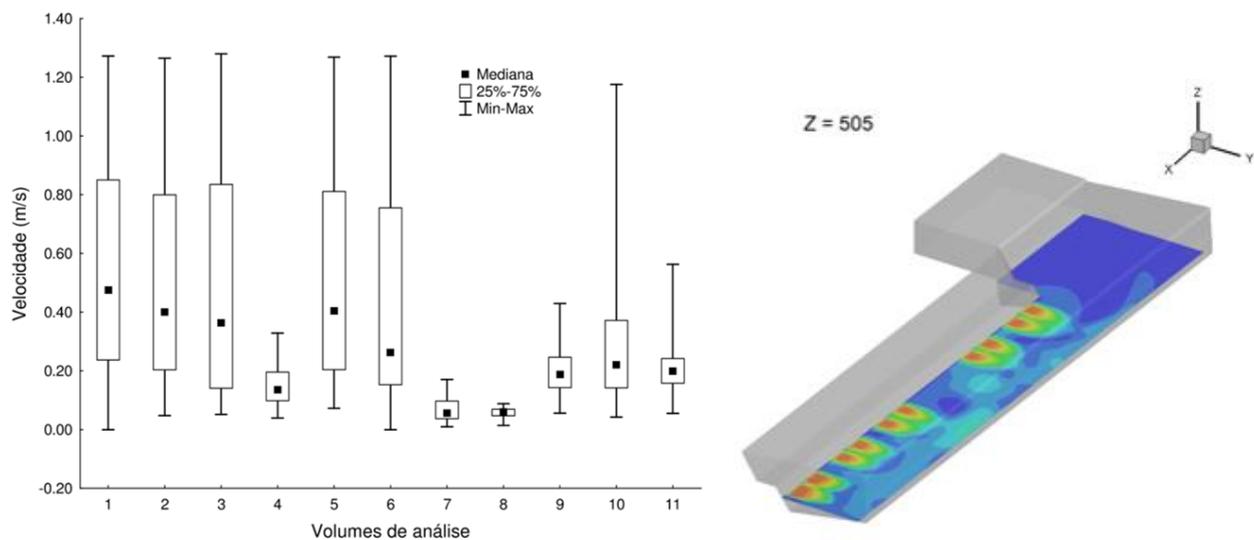


Figura 4 – A esquerda boxplot da velocidade nos volumes de análise e a direita representação da velocidade no modelo

### 2. Análise da presença dos peixes

A partir da ANOVA observou-se que o fator volume de análise afeta significativamente a presença de peixe nos testes conduzidos para o Mandi (tabela 1 e tabela 2). No entanto, a pequena quantidade de amostras de Curimba não permitiu estabelecer essa relação.

Tabela 1 - ANOVA Mandi novembro

	Grau de Liberdade	SS	MS	F	P
Volume	1	104.9	104.86	10.99	0.00151
Erro	64	610.8	9.54		

Tabela 2 - ANOVA Mandi dezembro

	Grau de Liberdade	SS	MS	F	P
Volume	1	462.5	462.5	33.16	1.28e-07
Erro	86	1199.4	13.9		

O boxplot para o Mandi no mês de dezembro indica que a presença no volume 1 é significativamente maior que nos outros volumes. Já no mês de novembro a presença é melhor distribuída nos volumes 1, 2, 3, 4 e 5. Os volumes menos frequentados tanto em dezembro quanto novembro são os volumes 7, 8 e 11 (figura 5).

O boxplot para a Curimba no mês de dezembro indica que a presença nos volumes 2 e 9 é expressivamente maior que nos outros volumes. Já no mês de novembro, optou-se por um gráfico de barras, pois os pontos coletados pertenciam a apenas um indivíduo, nesse gráfico observa-se que o indivíduo frequenta o volume 2 na maior parte do tempo. Observa-se que, nos dois meses analisados, os volumes 6, 7, 8 e 11 registraram poucas presenças dos peixes (figura 6).

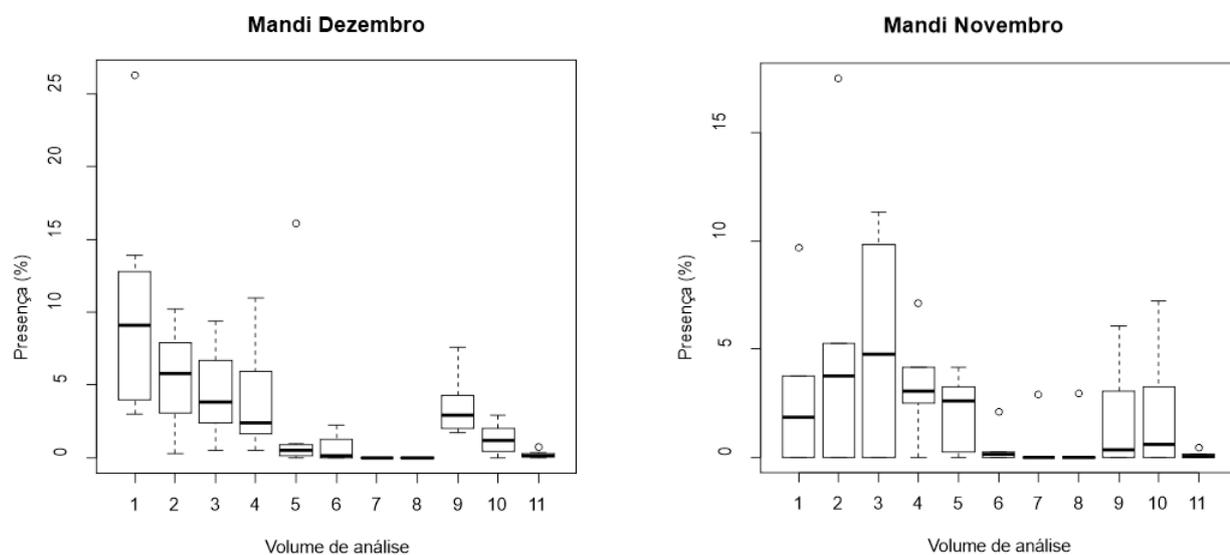


Figura 5 – Percentual de presença de Mandi em cada volume

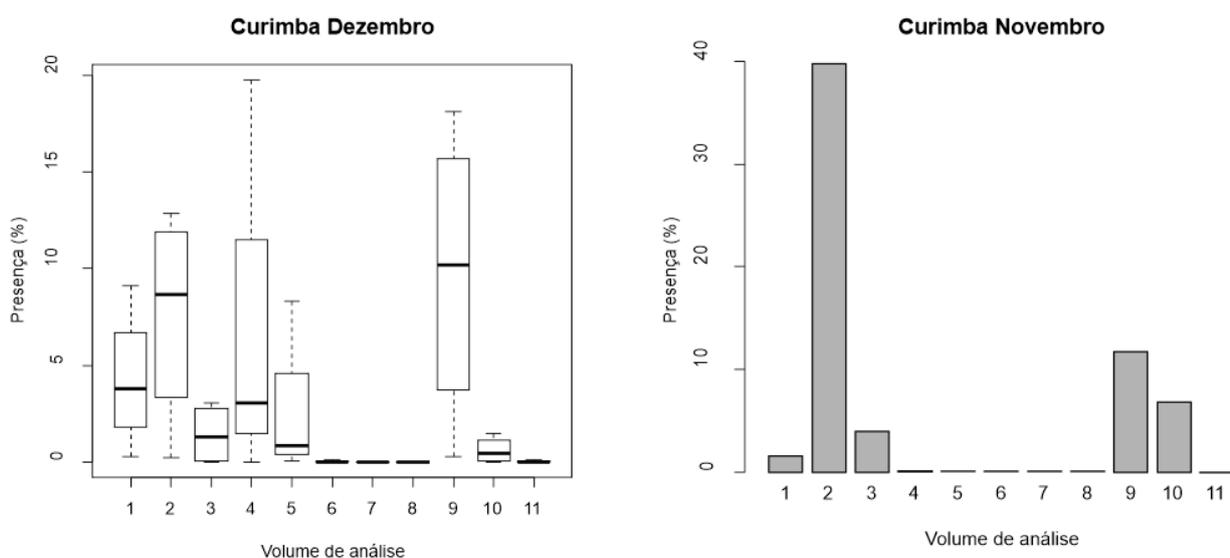


Figura 6 – Percentual de presença de Curimba em cada volume

## CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da velocidade no comportamento das espécies de peixes Curimba e Mandi no canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias. A partir dos dados apresentados para a Curimba pode-se concluir que ocorre uma atração por áreas de maior velocidade. Verifica-se que os volumes 11, 7 e 8, com menores velocidades, apresentaram menor percentual de presença juntamente aos volumes 5 e 6 que se encontram entre elas.

Já os dados apresentados para o Mandi revelam que também há uma atração por áreas de maior velocidade, porém o Mandi apresenta uma frequência um pouco maior que a da Curimba nos volumes de velocidade baixa. Verifica-se ainda que no mês de novembro o Mandi apresenta uma distribuição mais dispersa, embora nos dois meses a região mais frequentada está entre a turbina 1 e a turbina 4.

Diante do exposto acredita-se que a velocidade exerce influência sobre as duas espécies estudadas, afetando mais o comportamento da Curimba que o do Mandi, provavelmente, em função das diferenças entre as capacidades natatórias das duas espécies (SANTOS *et al.*, 2008; VIANA *et al.*, 2012). As informações aqui obtidas podem ser utilizadas para compreender melhor o fenômeno de falsa atração, evitar sua ocorrência e auxiliar o desenvolvimento de projetos que melhorem a atração de peixes por estruturas de transposição seguras.

## AGRADECIMENTOS

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG), pelo apoio financeiro (bolsa de mestrado e doutorado) e educacional. À Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG pelo apoio financeiro e informações fornecidas. À FAPEMIG pelo apoio financeiro (bolsa de mestrado).

## REFERÊNCIAS

ANEEL; BIG. Agência Nacional de Energia Elétrica; Banco de Informações de Geração. (2019) Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 03 abr. 2019.

ARENAS, A.; POLITANO, M; WEBER, L.; TIMKO, M. (2015) “*Analysis of movements and behavior of smolts swimming in hydropower reservoirs*”. Ecological Modelling, v. 312, p. 292–307.

CHEN, S.; CHEN, B.; FATH, B. D. (2015). “*Assessing the cumulative environmental impact of hydropower construction on river systems based on energy network model*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, p. 78-92.

DANESHVAR, F.; NEJADHASHEMI, WOZNICKI, S. A. ; HERMAN, M. R. (2017). “*Applications of computational fluid dynamics in fish and habitat studies*”. *Ecohydrology & Hydrobiology*. v.17, p. 53–62.

DELAVAN, S.K.; SOOD, S.; PEREZ-FUENTETAJA, A.; HANNES, A.R. (2017). “*Anthropogenic turbulence and velocity barriers for upstream swimming fish: A field study on emerald shiners (Notropis atherinoides) in the Upper Niagara River*”. *Ecological Engineering*. v. 101 , p. 91–106.

FANTIN-CRUZ, I.; PEDROLLO, O.; GIRARD, P.; ZEILHOFER, P.; HAMILTON, S. K. . (2015). “*Effects of a diversion hydropower facility on the hydrological regime of the Correntes River, a tributary to the Pantanal floodplain, Brazil*”. *Journal of Hydrology*. v.531, p. 810–820.

GOODWIN, R. A.; NESTLER, J. M.; ANDERSON, J. J.; WEBER, L. J.; LOUCKS, D. P. (2006). “*Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM)*”. *Ecological Modelling*, v. 192, n. 1–2, p. 197–223.

GOODWIN, R. A.; POLITANO, M.; GARVIN, J. W.; Nestler, J.M.; HAY, D.; ANDERSON, J. J.; WEBER, L. J.; DIMPERIO, E. ; SMITH, D. L. ; TIMKO, M. (2014). “*Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience*”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 14, p. 5277–5282.

GOOGLE EARTH-MAPAS. (2019). [Http://mapas.google.com](http://mapas.google.com). Data da imagem: 23/02/2019.

KATOPODIS, C.; SILVA, A. T.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, M. T.; PINHEIRO, A. N. (2012). “*Passage Efficiency of offset and straight orifices for upstream movements of iberian barbel in a pool-type fishway*”. *River Research and Applications*.

KLIMLEY A. P.; MACFARLANE R. B.; SANDSTROM, P. T.; LINDLEY, S. T. (2013). “*A summary of the use of electronic tagging to provide insights into salmon migration and survival*”. *Environmental Biology of Fishes*, v. 96, p. 419–28.

LOCHER, H.; SCANLON, A. (2012). “*Sustainable Hydropower – Issues and Approaches, Hydropower - Practice and Application*”, InTech. Chapter I.

LOURES, R. C. (2009). “*A Compatibilização da operação de Usinas com a Ictiofauna*”, *Revista Ação Ambiental*, v. 12, n. 41, p. 24–28

LOURES, R. C.; GODINHO, A. L. (2016). “*Avaliação de risco de morte de peixes em usinas hidrelétricas*”. *SÉRIE PEIXE VIVO*, v. 5, p. 329.

PIPER, A. T.; MANES, C.; SINISCALCHI, F.; MARION, A.; WRIGHT, R. M.; KEMP, P.S. (2015) . “*Response of seaward-migrating European eel (Anguilla anguilla) to manipulated flow fields*”. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 282, n. 1811, p. 1098 .

POLITANO, M.; CARRICA, P.; WEBER, L. (2009). “*A multiphase model for the hydrodynamics and total dissolved gas in tailraces*”. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 35, n. 11.

SANTOS, H. DE; DUARTE, B. (2012). “*Tensão de Reynolds e Velocidade Média em uma Escada*

para Peixes do Tipo Ranhura Vertical: Comportamento Preferencial da Espécie *Leporinus reinhardtii*". Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 2, p. 157–167.

SANTOS, H. A., POMPEU, P. S., VICENTINI, G. S., MARTINEZ, C. B. (2008). *Swimming performance of the freshwater neotropical fish: Pimelodus maculatus Lacepède, 1803*. Brazilian Journal of Biology, 68(2), 433-439.

SILVA, A. T.; KATOPODIS, C.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, M. T.; PINHEIRO, A. N. (2012) "Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow". Ecological Engineering, v. 44, p. 314–328.

SOLANO, D. T. (2017). "Modelo de Comportamento de Peixes no Trecho a Jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias". (Mestrado Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte,.

SUZUKI, F. M. (2014). "Estudo Do Comportamento De Peixes No Canal De Fuga Da Usina Hidrelétrica de Três Marias Utilizando Telemetria Acústica". (Doutorado em Ecologia Aplicada). Universidade Federal e Lavras.

SUZUKI, F. M.; DUNHAM, J. B.; SILVA, L. G. M.; ALVES, C.B. M.; POMPEU, P. S. (2017). "Factors Influencing Movements of Two Migratory Fishes within the Tailrace of a Large Neotropical Dam and their Implications for Hydropower Impacts". River Research and Applications, v. 33, n. 4, p. 514–523.

VIANA, E. M. DE F.; SALIBA, A. P. M.; MARTINEZ, C. B.; TOLENTINO, B. DA S.; TOMÉ, F. L. F. DE O.; FARIA, M. T. C. (2016). "Análise do comportamento hidráulico de um mecanismo de transposição de peixes do tipo escada com ranhura vertical em duas declividades". RBRH, v. 21, n. 4, p. 811–820.

VIANA, E. M. D. F.; POMPEU, P. S.; MARTINEZ; C. B. (2012). *Optimal swim speeds by respirometer: an analysis of three neotropical species*. Neotropical Ichthyology, 10(4), 805-811.

WANG, Y.; XIA, Z.; WANG, D. (2012). "Characterization of hydraulic suitability of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) spawning habitat in the Yangtze River". Hydrological Processes, v. 26, n. 23, p. 3489–3498 .

ZARE, R.; KALANTARI, B. (2018). "Evaluating Negative Environmental Impacts Caused by Dam Construction". Urban Studies and Public Administration. v. 1, n. 1.